

# 多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略研究

卢亮<sup>1</sup>, 方宇<sup>1</sup>, 滕均<sup>1</sup>, 王聪聪<sup>1</sup>, 桑致远<sup>2</sup>, 张继勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>扬州大学信息与人工智能学院(工业软件学院), 江苏 扬州

<sup>2</sup>扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年4月8日; 发布日期: 2026年6月4日

## 摘要

针对多逆变器并联系统中由于线路阻抗不匹配及参数离散性引起的有功与无功功率耦合严重、功率分配不均以及环流问题, 提出多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略。该方法在传统下垂控制基础上, 引入虚拟阻抗重塑输出阻抗特性, 并结合自适应功率解耦下垂控制策略, 实现功率解耦与高精度均分。通过主从控制架构, 各逆变器实时上传功率信息, 主控制器计算平均功率并下发, 从控制器通过PI调节生成频率与电压修正量叠加于下垂控制输出。该策略兼具分布式控制的稳定性与集中控制的精确性, 有效抑制系统环流, 提高系统稳定性与动态性能。

## 关键词

逆变器并联, 下垂控制, 功率解耦, CAN总线, 虚拟阻抗

# Research on Multi-Inverter Adaptive Power Decoupling Droop Control Strategy

Liang Lu<sup>1</sup>, Yu Fang<sup>1</sup>, Jun Teng<sup>1</sup>, Congcong Wang<sup>1</sup>, Zhiyuan Sang<sup>2</sup>, Jiyong Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Information and Artificial Intelligence (College of Industrial Software), Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

<sup>2</sup>College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: March 26, 2026; accepted: April 8, 2026; published: June 4, 2026

## Abstract

Aiming at the problems of severe active and reactive power coupling, uneven power distribution and circulating current in multi-inverter parallel systems caused by line impedance mismatch and parameter discreteness, an adaptive power decoupling droop control strategy based on CAN bus is proposed. On the basis of traditional droop control, this method introduces virtual impedance to

文章引用: 卢亮, 方宇, 滕均, 王聪聪, 桑致远, 张继勇. 多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略研究[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(3): 179-189. DOI: 10.12677/aepe.2026.143019

reshape the output impedance characteristics, and combines with the adaptive power decoupling droop control strategy to realize power decoupling and high-precision power sharing. Through the master-slave control architecture, each inverter uploads power information in real time; the master controller calculates the average power and distributes it to slave controllers, which generate frequency and voltage correction quantities via PI regulation and superimpose them on the output of droop control. This strategy integrates the stability of distributed control and the accuracy of centralized control, effectively suppresses the system circulating current, and improves the system stability and dynamic performance.

## Keywords

Inverter Parallel, Droop Control, Power Decoupling, CAN Bus, Virtual Impedance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着新能源发电技术及新型电力系统架构的迅猛发展, 电力电子变换装置的单机容量需求日益攀升[1]。受限于功率半导体器件的耐压等级、散热阈值等物理瓶颈, 单台逆变器难以独立满足大功率应用场景的需求, 因此采用多台逆变器模块化并联运行以扩展系统总容量[2], 已成为提升供电能力及增强系统可靠性的主流技术方案。

在逆变器并联控制系统中, 下垂控制因其无需互联通信线、依靠本地信息即可实现功率自主分配的特性, 被广泛应用。理想状态下, 下垂控制基于输出阻抗呈纯感性的假设, 利用有功功率主要受电压频率控制、无功功率主要受电压幅值影响的传输特性, 理论上可实现有功与无功控制通道的自然解耦[3]。

然而在实际工程应用中, 特别是在低压微电网并联系统中, 由于电缆长度较短且内阻较大, 物理线路阻抗往往呈现显著的阻感性耦合特征[4]。此时线路阻抗角并非理想的九十度纯感性, 而是包含显著的电阻分量。这导致有功功率与电压幅值、无功功率与频率之间存在强烈的交叉耦合效应, 使得传统的下垂控制公式在实际运行中处于不完全解耦状态, 极易引发功率低频振荡, 导致并联系统的小信号稳定性下降[5]。同时, 解耦不彻底致使各并联单元间的输出电压矢量难以精确同步, 从而在单元间产生显著的基波环流, 严重降低系统的整体寿命与运行安全性。

针对线路阻抗阻感性强耦合及参数离散性带来的功率均分与环流问题, 近五年来学术界开展了广泛研究。其一, 学者们提出了基于自适应或动态虚拟阻抗的改善策略, 通过在控制回路中引入虚拟阻抗来强行拉大系统的阻抗角, 或设计动态虚拟阻抗以抑制环流, 但这类策略往往高度依赖于对物理馈线阻抗的在线精确辨识, 在多机并联的复杂时变网络中面临计算负荷较重且鲁棒性不足的问题[6]。其二, 研究人员尝试采用非线性或改进型下垂控制策略, 诸如引入自适应虚拟电阻的改进下垂控制, 从控制律本身出发消除耦合, 但在面对严重的阻抗不匹配及硬件参数高度离散的工程场景时, 系统的动态响应速度与稳态均分精度往往难以兼顾[7]。其三, 基于低速通信的分布式或一致性控制策略借助多智能体一致性算法, 通过相邻逆变器间的数据交互来实现全局功率的精确分配, 该方法虽然均分精度高, 但对通信拓扑的连通性要求苛刻, 且在通信网络存在的随机延时或丢包时, 系统的小信号闭环稳定性分析与控制器参数设计会变得极其复杂[8]。

综上所述, 现有的常规策略在面对线路阻抗强耦合、参数离散及高精度稳态均分需求时, 往往难以

兼顾控制的简便性、动态稳定性与稳态精度。为克服上述缺陷,本文基于已有的 CAN 总线,提出了一种多逆变器并联的自适应功率解耦下垂控制策略。相较于现有研究,本研究的独特贡献与优势首先体现在其摆脱了对物理阻抗精确辨识的依赖,直接提取并联系统的平均功率作为基准构建闭环纠偏项,从闭环控制层面实现了有功与无功分量的深度解耦;其次,本策略有效兼顾了低带宽通信与高精度控制,充分利用 CAN 总线现有的通信能力,避免了多智能体分布式一致性算法中繁琐的迭代计算,仅通过代数叠加修正量即可在低通信带宽下彻底消除硬件离散性及阻抗不一致带来的环流;最后,本方法显著提升了系统的鲁棒性与小信号稳定性,实验与仿真表明,该策略在抑制功率耦合引发的低频振荡方面效果显著,有效解决了多机并联系统在阻感性网络中的功率分配畸变问题。

## 2. 多逆变器并联系统控制架构及存在问题分析

### 2.1. 并联系统总体架构

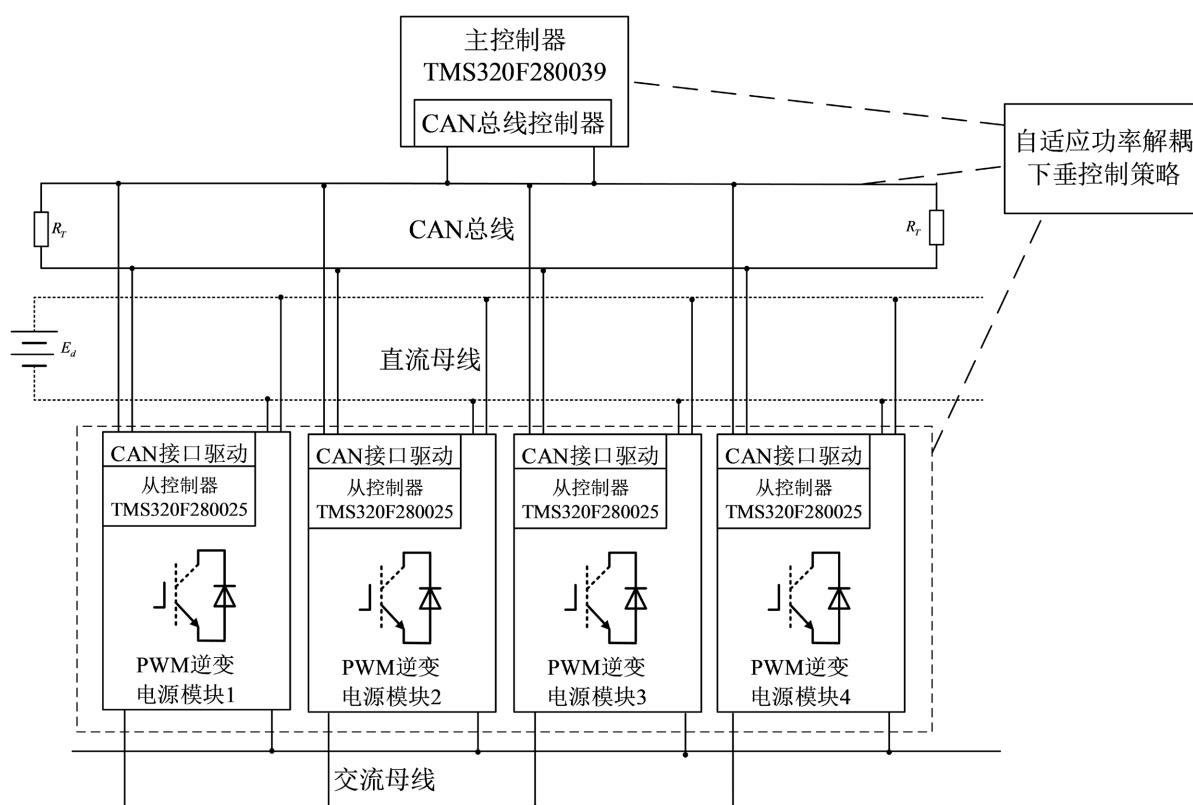


Figure 1. Multi-inverter parallel system architecture  
图 1. 多逆变器并联系统架构

本文所研究的多逆变器并联系统架构如图 1 所示,本系统采用主从式控制、CAN 总线、多功率模块并联、和自适应功率解耦下垂控制策略的架构形式。其核心包括主控制器、从控制器、CAN 总线、直流母线、PWM 逆变模块、交流母线及自适应功率解耦下垂控制策略。其中,主控制器作为全局调度与协调中枢,主要负责处理并联系统的全局信息。在逆变器投入并联前,主控制器负责向所有从控制器发送相位同步信号并请求电压信号,以完成严格的相位预同步与电压预同步,实现多机系统的无缝并联[9]。在并联运行后,主控制器则在每个电网周期定期收集各从机模块上传的有功功率与无功功率,经统一汇总后计算出系统的平均有功功率与无功功率,并利用 CAN 总线的广播模式实时下发给所有从控制器。从控

制器作为本地闭环与执行单元，主要用于控制功率电路，其底层采用本地电压电流双闭环控制、传统下垂控制以及虚拟阻抗策略，赋予了各逆变模块功率自主分配的基础能力。在接收到主控制器下发的多逆变器并联系统的平均功率指令后，从控制器通过差值比较建立闭环纠偏机制，利用 PI 调节器生成有功 - 频率修正量和无功 - 电压修正量。这些修正量被动态叠加至传统下垂控制的给定值上，从而完成自适应功率解耦下垂控制，实现高精度的功率均分。同时，连接主从控制器的 CAN 总线不仅具有实时性强、抗干扰能力高等优势，且通信延迟一致，无需复杂的通信延迟补偿算法。

### 2.2. 三相 T 型三电平四线制逆变器拓扑结构

三相 T 型三电平四线制逆变器拓扑结构图如图 2 所示，其由三个完全对称的桥臂组成，每个桥臂对应逆变器的一个相(A 相、B 相、C 相)，由四个呈现 T 型排列的功率开关管  $Q_{x1} \sim Q_{x4}$  ( $x = u, v, w$ ) 和其寄生二极管  $D_{k1} \sim D_{k4}$  ( $k = u, v, w$ ) 组成；直流侧由两个串联的直流电容  $C_{dc1}$  和  $C_{dc2}$  组成，形成直流母线电压  $V_{bus}$ ，其电压中点记为 O 点； $L_s$  和  $C_{su}, C_{sv}, C_{sw}$  分别为交流的滤波电感和滤波电容，其中  $R_s$  为滤波电感  $L_s$  的寄生电阻； $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  分别为 A 相、B 相和 C 相的交流输出，其电压中点记为 N 点。

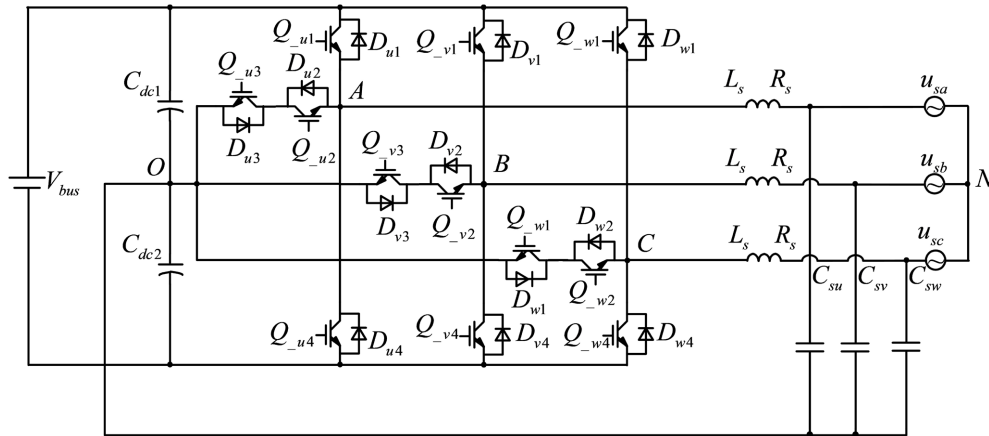


Figure 2. Three-phase T-type three-level inverter topology  
图 2. 三相 T 型三电平逆变器拓扑结构

### 2.3. 传统下垂控制存在的问题

在逆变器并联系统中，传统下垂控制通过模拟同步发电机的外特性，在无需互联通信线的条件下实现功率的自主分配[10]。其核心思想是根据逆变器输出的有功功率和无功功率，实时调节输出电压的频率与幅值，其理想状态下的基本数学关系遵循：

$$\begin{cases} f = f_0 - m(P - P^*) \\ E = E_0 - n(Q - Q^*) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， $P$  和  $Q$  分别逆变器输出有功功率和无功功率， $f_0$  和  $E_0$  分别为逆变器的额定频率与额定电压幅值， $m$  和  $n$  分别为有功 - 频率下垂系数和无功 - 电压下垂系数， $P^*$  和  $Q^*$  分别逆变器输出有功功率和无功功率的参考功率， $f$  和  $E$  分别为逆变器输出的实际频率与实际电压幅值。

在理想的纯感性线路条件下，有功功率主要由相位(频率)调节，而无功功率则由电压幅值调节[11]，这种基于强电感特性的映射关系使得功率控制通道能够实现自然解耦，从而保证系统在负载波动时自发实现功率平衡。

然而在实际工程应用中,传统下垂控制面临着严峻的物理局限性。低压微电网的馈线较短且电缆内阻较大,导致物理线路阻抗呈现显著的阻感性耦合特征,输出阻抗角严重偏离 90 度的理想感性状态。在这种非理想阻抗环境下,有功与无功功率之间存在严重的交叉耦合,即有功功率的变化会引起电压幅值的波动,而无功功率的变动则会干扰输出频率。这种耦合效应不仅破坏了下垂控制的线性分配逻辑,还会导致各并联单元间的电压矢量难以精确同步,进而引发显著的环流。此外,硬件参数的离散性与线路阻抗的不对称性会进一步放大这种不均衡,导致部分逆变模块过载运行,严重威胁并联系统的运行稳定性和设备安全。因此,单纯依靠传统下垂控制已无法满足高性能并联系统的要求,必须从物理层阻抗重塑与控制层闭环纠偏两个维度进行深度改进。

### 3. 多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略

#### 3.1. 控制策略

本文所提控制策略通过物理层虚拟阻抗与通信层的功率解耦相结合,构建了一种多维协同的控制体系,旨在从根源上消除功率耦合。在物理层设计中,针对低压微电网线路阻抗呈现阻感性的本质缺陷,从控制器在输出电压反馈回路中引入了虚拟阻抗环节。通过模拟等效复阻抗  $Z = sL - R$ ,该环节能够动态抵消实际物理线路中的电阻分量,并人为补偿感性分量。这种阻抗重塑技术实质上是在不产生实际功率损耗的前提下,改变了逆变器的输出外特性,使其等效传输阻抗强制呈现纯感性。这为下垂控制提供了理想的物理运行环境,使得有功与无功的流动规律重新回归到频率与电压的单向映射中,实现了功率的初步物理解耦。

在通信层逻辑中,系统进一步利用 CAN 总线的高速交互能力,引入了基于均值反馈的自适应功率解耦策略。主控制器以电网周期(20 ms)为采样基准,实时发起全网功率查询指令。各从机模块在接收指令后,将本地采集的有功功率  $P_i$  与无功功率  $Q_i$  通过 CAN 总线上传至主控制器。主控制器对汇总数据进行算术平均运算,得出全局平均有功功率  $\bar{P}$  与平均无功功率  $\bar{Q}$ ,并以广播形式下发至所有并联单元的从控制器。这一过程建立了系统级的全局信息场,使每个独立运行的逆变模块都能实时获知系统的平均负荷状态,从而为消除模块间的离散性偏差提供了统一的参考基准。

各从控制器在获取全局平均功率指令后,进入自适应功率解耦阶段。通过将本地实时功率与主控下发的平均功率进行实时比对,系统构建了功率误差闭环。该误差经过 PI 调节器的动态补偿运算,生成频率修正量  $\Delta f$  和电压幅值的修正量  $\Delta E$ 。最终,这些自适应修正项被叠加到传统下垂控制的输出端,其数学表达重构为:

$$\begin{cases} \Delta f = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (P - \bar{P}) \\ \Delta E = \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right) (Q - \bar{Q}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $k_p$  和  $k_i$  分别为 PI 调节器的比例参数和积分参数,  $P$  和  $Q$  分别逆变器输出有功功率和无功功率,  $\bar{P}$  和  $\bar{Q}$  分别逆变器并联系统中的平均有功功率和平均无功功率,  $\Delta f$  和  $\Delta E$  分别为频率修正量和电压幅值修正量。

这种控制架构将开环的下垂分配转变为闭环的均值跟踪,不仅动态补偿了因阻抗不匹配产生的静态偏差,还通过 PI 调节器的积分作用彻底消除了功率分配的稳态误差。物理层的阻抗感性化与通信层的闭环精确化深度融合,确保了系统在复杂工况下依然能保持高度的功率解耦能力与均流精度。

#### 3.2. 软件通讯

从控制器逆变模块的 DSP 芯片采用 TMS320F280025, 主控制器的 DSP 芯片采用 TMS320F280039。

系统通过 CAN 总线进行通信，波特率设定为 500 kbps。通信邮箱配置方面，主控制器与从控制器均配置发送邮箱 5 和接收邮箱 1。其中，主控制器通过邮箱 5 发送主机模块的信息，通过邮箱 1 接收从机模块的信息；从控制器通过邮箱 5 发送从机模块与主机之间的信息，通过邮箱 1 接收从机模块与主机之间的信息。主从之间采用邮箱 5 作为发送邮箱，接收邮箱均为邮箱 1，且将接收中断设置为高优先级模式。从控制器的邮箱 1 支持以中断或中断标志位查询方式接收数据，主控制器采用邮箱 5 发送正序电压幅值、相位同步信号、请求电压信号、请求有功功率和无功功率信号，从控制器根据主控制器的请求和要求处理数据。在控制策略与功能分配上，主控制器主要实现相位和电压预同步以及有功功率和无功功率平均处理。从控制器逆变模块则实现本地电压电流双闭环控制、传统下垂控制和虚拟阻抗控制。自适应功率解耦下垂控制策略则由主控制器、CAN 总线 and 从控制器三者配合实现。

主从控制器的邮箱信息接收程序流程图如图 3 所示。首先完成通信初始化：配置 CAN 模块接收/发送寄存器，建立硬件通信环境；设置接收邮箱标识符与掩码，过滤目标协同控制消息；将邮箱 1 配置为接收模式、邮箱 5 配置为发送模式，明确收发分工。随后进入消息监听与处理阶段：通过查询接收中断标志位判断新消息状态，若标志位未复位则持续等待，支持中断或查询两种触发方式；若标志位复位，读取并处理接收数据，同时复位发送应答位与发送标志位，为后续通信做准备。

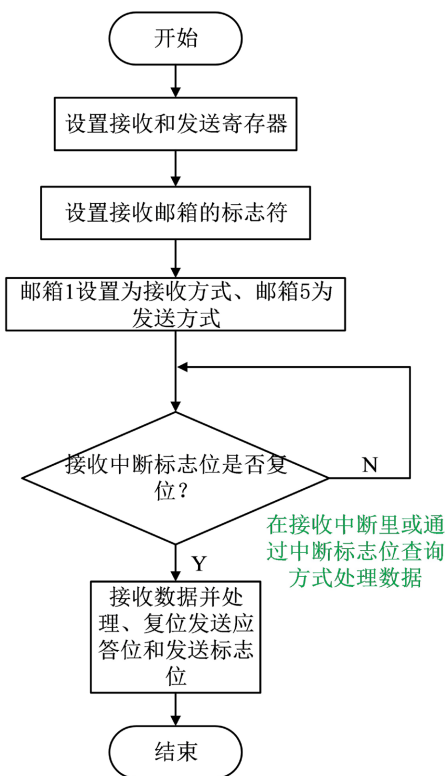
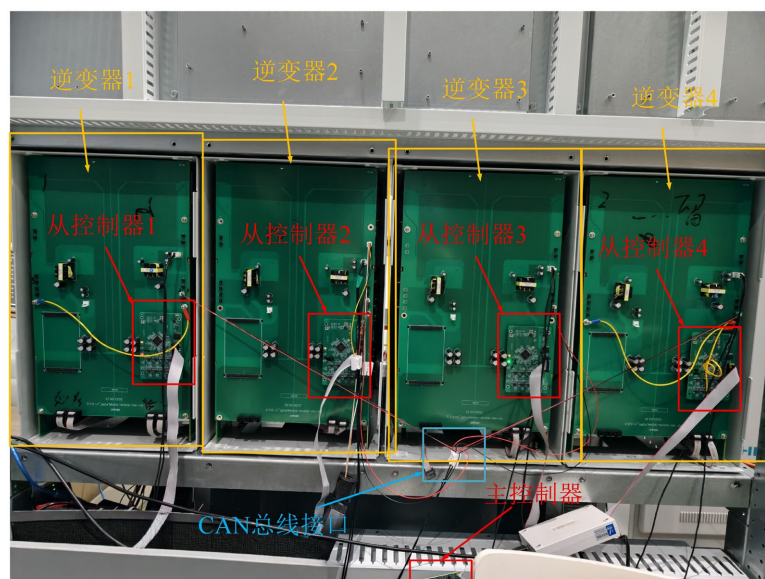


Figure 3. Flow chart of information receiving program  
图 3. 信息接收程序流程图

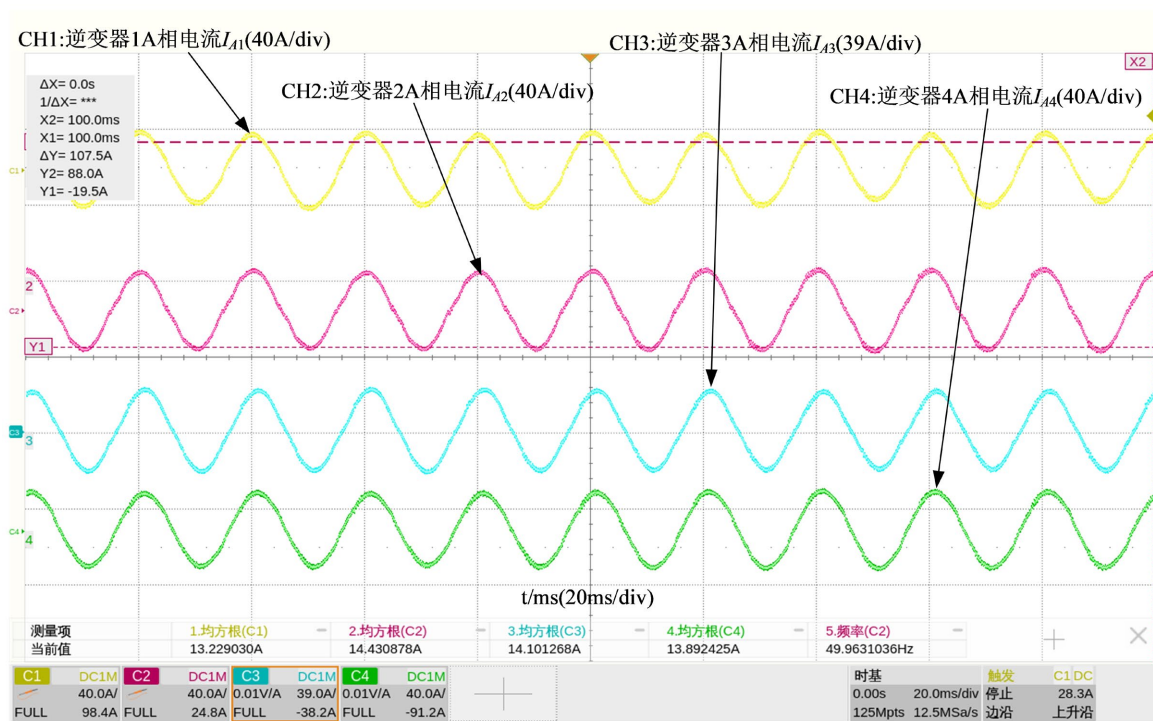
#### 4. 实验验证

为了验证本文所提控制策略的有效性，搭建了由四台三相 T 型三电平四线制逆变器构成的并联实验平台进行对比测试，如图 4 所示，四台逆变器的额定输出电压有效值均统一设定为 230 V，系统负载配置为视在功率 40 kVar、功率因数 0.8 的阻感性负载，以此模拟复杂的微电网运行环境。



**Figure 4.** Parallel system consisting of four three-phase t-type three-level inverters  
**图 4.** 四台三相 T 型三电平逆变器并联系统

在仅采用传统下垂控制与固定虚拟阻抗的复合控制模式下进行实验，图 5 所示为示波器测得的四台逆变器的 A 相电流，图 6 所示为功率分析仪测得的四台逆变器的 A 相输出数据。由于示波器精度不够，其电流采样存在误差，因此电流不平衡度数据以功率分析仪数据为准，示波器上的数据作为参考。图 5 和图 6 中的实验数据如表 1 和表 2 所示。



**Figure 5.** Output currents of four inverters under conventional droop control and virtual impedance composite control  
**图 5.** 传统下垂控制和虚拟阻抗复合控制下的四台逆变器输出电流



**Figure 6.** Output data of four inverters under composite control of conventional droop control and virtual impedance  
**图 6.** 传统下垂控制和虚拟阻抗复合控制下的四台逆变器输出数据

**Table 1.** Experimental data of output current for four inverters under composite control of conventional droop control and virtual impedance

**表 1.** 传统下垂控制和虚拟阻抗复合控制下的四台逆变器输出电流实验数据

逆变器编号	电流有效值/A	电流不均衡度
逆变器 1	13.229030	4.9188%
逆变器 2	14.430878	
逆变器 3	14.101268	
逆变器 4	13.892425	

**Table 2.** Experimental output data of four inverters under composite control of conventional droop control and virtual impedance

**表 2.** 传统下垂控制和虚拟阻抗复合控制下的四台逆变器输出实验数据

逆变器编号	电压有效值 /V	电流有效值 /A	电流不均衡度	有功功率 /W	有功功率不均衡度	无功功率 /W	无功功率不均衡度
逆变器 1	219.57	14.10	5.0682%	2508	4.5662%	1815	6.2937%
逆变器 2	219.62	14.80		2630			
逆变器 3	219.66	15.60		2745			
逆变器 4	219.66	14.89		2629			

由表 1 和表 2 可以看出, 尽管引入了固定虚拟阻抗, 但由于线路物理阻抗的不对称以及功率耦合效应的残余, 系统内部仍存在较明显的环流现象, 导致功率分配精度无法满足高可靠性供电的要求。

在保持相同硬件环境与负载条件下, 切换至本文提出的基于 CAN 总线的多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略进行验证。图 7 所示为示波器测得的四台逆变器的 A 相电流, 图 8 所示为功率分析仪测得的四台逆变器的 A 相输出数据。图 7 和图 8 中的实验数据如表 3 和表 4 所示。

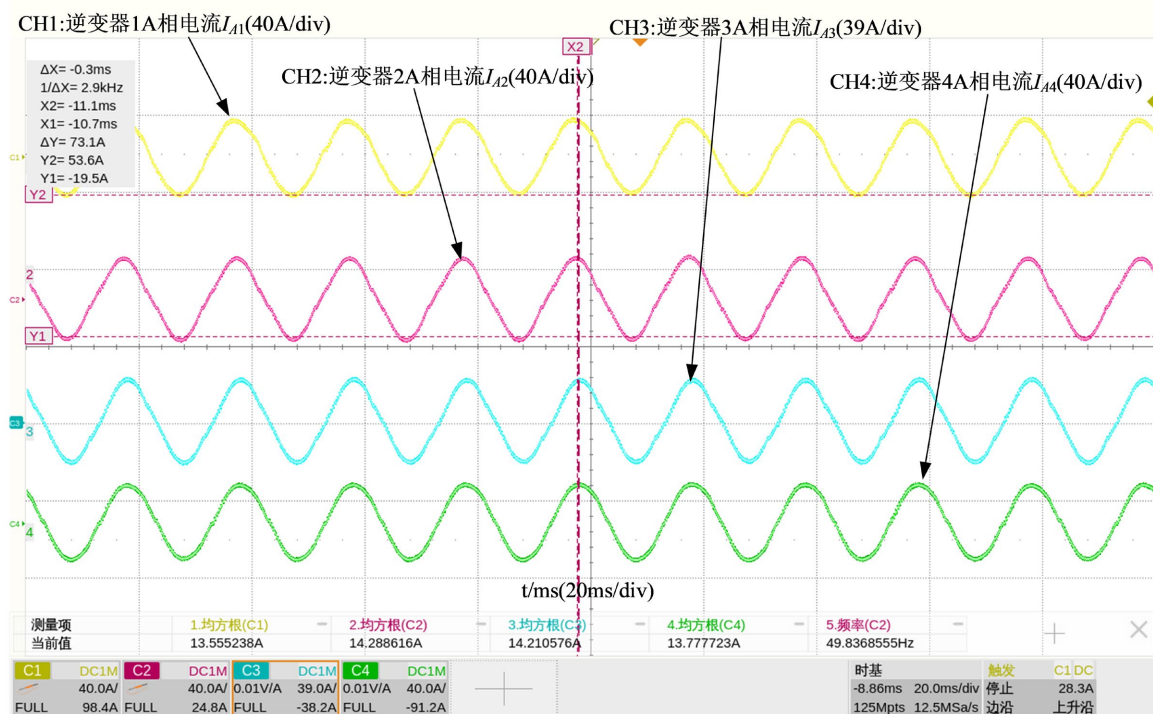


Figure 7. Output current of four inverters under multi-inverter adaptive power decoupling droop control CAN bus  
图 7. 多逆变器自适应功率解耦下垂控制下的四台逆变器输出电流

分别对比表 1 和表 3, 表 2 和表 4 明显发现, 采用自适应功率解耦下垂控制策略后, 在功率分析仪测得四台逆变器的有功功率不平衡度从 4.5662% 大幅降低至 1.6911%, 无功功率不平衡度从 6.2937% 大幅降低至 2.8942%, 电流不平衡度从 5.0682% 大幅降低至 2.1047%。在示波器测得四台逆变器的电流不平衡度从 4.9188% 大幅降低至 2.8858%。虽然无功功率的不平衡度从 6.2937% 大幅降低至 2.8942%, 但无功功率不平衡度的改善程度不如有功功率, 其主要原因是: 有功功率受电压频率影响, 而无功功率受电压幅值影响, 实际并联系统中的线路阻抗不一致依然会使输出的电压幅值存在微小电压差, 同时电压幅值的测量精度相较于频率更易受传感器采样的影响, 从而对无功功率分配精度造成一定的影响。

通过上述对比实验分析, 本文所述策略展现出如下显著优势:

第一, 极高的功率与电流均分精度。实验数据表明, 在引入自适应功率解耦下垂控制策略, 实现了逆变器的有功与无功分量的深度解耦, 进而提升了功率均分精度, 有效避免了因功率耦合引发的低频振荡, 显著提升了多逆变器并联系统的稳定性, 各模块间的电流偏差得到了显著抑制。

第二, 显著的环流抑制效果与系统稳定性。电流不平衡度的减小直接反映了并联系统内部环流的降低。通过本文所提控制策略, 各逆变器单元的热应力分布更加均匀, 避免了单台模块过载运行的风险, 从而降低了系统整体损耗, 显著提升了多机并联运行的安全性与鲁棒性。



Figure 8. Output data of four inverters under multi-inverter adaptive power decoupling droop control CAN bus

图 8. 多逆变器自适应功率解耦下垂控制下的四台逆变器输出数据

Table 3. Experimental data of output current of four inverters under multi-inverter adaptive power decoupling droop control

表 3. 多逆变器自适应功率解耦下垂控制下的四台逆变器输出电流实验数据

逆变器编号	电流有效值/A	电流不均衡度
逆变器 1	13.555238	2.8858%
逆变器 2	14.288616	
逆变器 3	14.210576	
逆变器 4	13.777723	

Table 4. Experimental output data of four inverters under composite control of conventional droop control and virtual impedance

表 4. 传统下垂控制和虚拟阻抗复合控制下的四台逆变器输出实验数据

逆变器编号	电压有效值 /V	电流有效值 /A	电流不均衡度	有功功率 /W	有功功率不均衡度	无功功率 /W	无功功率不均衡度
逆变器 1	219.57	14.73	2.1047%	2600	1.6911%	1922	2.8942%
逆变器 2	219.62	14.68		2607			
逆变器 3	219.66	15.16		2676			
逆变器 4	219.66	14.82		2643			

## 5. 结论

针对低压微电网中多逆变器并联系统因线路阻抗不匹配及硬件参数离散性引发的有功与无功功率耦合严重、分配不均以及环流问题, 本文提出了一种多逆变器自适应功率解耦下垂控制策略。该策略在物理层引入虚拟阻抗环节, 动态抵消线路电阻分量以重塑纯感性输出特性, 为功率解耦提供理想的物理运行环境; 同时在通信层依托 CAN 总线构建主从架构的平均功率闭环反馈机制, 将各模块实时功率与全局平均功率进行比对, 并通过 PI 调节生成频率与电压的自适应修正量。这种多维协同架构将传统开环下垂分配转化为闭环均值跟踪, 从控制原理上彻底消除了由阻抗差异带来的稳态分配偏差。

基于四台三相 T 型三电平四线制逆变器并联实验平台的验证结果表明, 所提控制策略能够实现极高的功率与电流均分精度。相较于仅采用传统下垂控制与固定虚拟阻抗的复合模式, 系统在采用自适应功率解耦的下垂控制闭环修正后的有功功率不平衡度从 4.5662% 大幅降低至 1.6911%, 无功功率不平衡度从 6.2937% 大幅降低至 2.8942%, 电流不平衡度从 5.0682% 大幅降低至 2.1047%。高精度的功率均衡有效削弱了各并联单元输出电压矢量的不同步现象, 显著抑制了系统内部的环流。该方法不仅使得各单元热应力分布更为均匀, 避免了单台模块过载运行的风险, 更兼顾了分布式控制的稳定性与集中控制的精确性, 全面提高了系统的稳定性与动态性能。

尽管本策略在功率解耦和稳态精度上取得了良好效果, 但在实际工程应用中仍存在一定的局限性。本系统采用的主从式控制架构对主控制器具有强烈的依赖性, 若主控制器发生故障或通信中断, 各从控制器将无法获取全局平均功率基准, 可能导致自适应修正项失效, 系统不得不退化至传统下垂模式运行。

基于上述局限性, 未来的研究工作可着重设计主从平滑切换与容错控制, 研究主控制器失效时的从机竞选机制或无缝切换至对等下垂控制的容错保护策略, 确保在通信极端故障下并联系统依然能保持基本稳定运行。

## 基金项目

江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX24\_2224), 扬州市厅科技合作资金计划项目(YZ2025201)。

## 参考文献

- [1] 赵争鸣, 袁立强, 鲁挺, 等. 我国大容量电力电子技术与应用发展综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 26-34.
- [2] 华明. 三相逆变器冗余并联运行关键技术及应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [3] 范必双, 付思维, 王文, 等. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网有功均分下垂控制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(5): 142-153.
- [4] 曾岭瑞, 刘毅力, 崔关奇. 基于虚拟电抗的微电网改进下垂控制策略[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(10): 69-76.
- [5] 卢星升. 基于微电网的多逆变器并联预测控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [6] 冯侃, 张乐楨, 周龙, 等. 并联逆变器的自适应无功均分的改进虚拟阻抗策略[J]. 电气传动, 2026, 56(1): 21-30, 40.
- [7] 徐振祥, 吴迪, 王在福, 等. 基于改进下垂控制多逆变器并联运行控制策略[J]. 计算机仿真, 2025, 42(7): 236-242.
- [8] 唐铭泽, 刘桂英, 李红, 等. 多分布式电源孤岛运行的多智能体协同控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 128-135.
- [9] 任鹏. 基于可调度虚拟振荡控制的微网并网无缝切换策略[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [10] 董长奇. 多逆变器接入的交流孤岛微电网分布式控制研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2025.
- [11] 姜忠辉. 光伏微电网的无功电压控制研究[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.